

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 681.586: 621.373: 535

ОПТИЧЕСКИЙ ДЕФЛЕКТОР КОРРЕКТОРА НАКЛОНА ВОЛНОВОГО ФРОНТА

© 2008 г. М. С. Слободян; С. М. Слободян, доктор техн. наук; А. А. Цупин, канд. техн. наук

Инновационный центр “ТЕСТ”, г. Томск

E-mail: sms@isk-trust.ru; Slobodyan_SM@ukr.net

Описан оптический дефлектор корректора волнового фронта управляемой оптической системы для компенсации случайных смещений фокального изображения лазерного пучка. Проведена оптимизация параметров дефлектора и его апробация в локационной системе. Эффективность решения – десятикратное снижение дисперсии случайных смещений изображения пучка в реальных условиях воздействия турбулентной среды.

Коды OCIS: 230.1150.

Поступила в редакцию 28.08.2007.

Применение в лазерной и оптической технике элементов адаптивной оптики и систем дает возможность управления амплитудно-фазовыми характеристиками излучения, несущего информацию о наблюдаемом пространством и объектах в нем. Адаптация и управление элементами тракта передачи оптического излучения с помощью дефлекторов – корректоров фронта – очень эффективна. Выигрыш зависит от сложности принятого алгоритма управления контуром адаптации, позволяющего снизить влияние искажений поля, вызванных факторами случайного и активного противодействия помех на конечный результат работы системы.

Из-за высокой стоимости, сложности и громоздкости элементов адаптивные системы, дающие полную компенсацию амплитудно-фазовых искажений, в том числе и мод высокого порядка аберраций, практически создаются в виде эксклюзивных образцов. Ввиду простоты и экономичности более привлекательны для широкого использования, в том числе для решения традиционных задач, управляемые оптические системы, компенсирующие влияние мод искажений фронта низкого порядка (наклон, дефокусировку) [1–4]. Их эффективность высока, что позволяет обеспечить необходимую стабилизацию поля и изображения [1–8].

Очевидно, что оптимизация параметров известных и поиск новых путей построения и оптимизации дефлекторов, повышающих быстродействие, эффективность и расширяющих диапазон их использования, на данном этапе развития управляемой оптической техники являются актуальными. Для фазовой коррекции волнового фронта требова-

ниям, предъявляемым к устройству управления, практически в полной мере удовлетворяют пьезоэлектрические дефлекторы [1–4].

Оптические дефлекторы с достаточно высоким быстродействием как элементы систем управления объектами, кроме лазерной, локационной, навигационной, тепловизионной и адаптивной техники [1–9], используются также в системах стабилизации оптических и телевизионных изображений. Несмотря на большое многообразие [3, 4] конструкций, вряд ли можно считать, что задача создания оптимальной конструкции оптического дефлектора решена. Дефлектор как элемент корректора волнового фронта имеет свои индивидуальные преимущества, ограничения и особенности, обусловленные комплексом требований, предъявляемых к решению специфической задачи управления параметрами объекта в реальном времени.

В настоящей статье рассмотрен оригинальный оптический дефлектор [5] как элемент корректора наклона волнового фронта управляемой оптической системы. Проведен анализ и оптимизация. Приведены результаты экспериментального исследования его эффективности в турбулентной среде при коррекции случайного наклона волнового фронта.

Конструкция дефлектора представлена (рис. 1) в виде независимого по каждой из координат управления наклоном фронта излучения He–Ne-лазера. Дефлектор представляет собой совокупность консольно разнесенных в пространстве двух изгибных биморфных элементов 1 и 2, закрепленных в оправа-опоре 3. К свободным концам изгибных элементов упругими тягами-подвесами 6 прикреплен

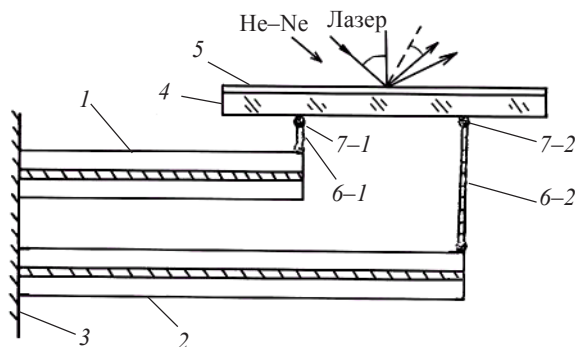


Рис. 1. Структурная схема дефлектора. Пояснения см. в тексте.

объект управления – плоское зеркало 4 с отражающим слоем 5, нанесенным на подложку. Шарнирное крепление зеркала 7 не ограничивает перемещения торца биморфа. Изгибные элементы в данной конструкции – условие обеспечения большего выигрыша в чувствительности. Для больших угловых отклонений объекта и двухкоординатного управления лучший вариант – тяги с микрошарнирным 7 узлом крепления зеркала.

При малых угловых отклонениях объекта управления – зеркала (порядка единиц градуса) тяги его подвеса для одно- и двухкоординатного управления могут быть выполнены на полимерных пластично-упругих материалах. Применение полимеров предпочтительно. Они имеют достаточно высокую прочность, хорошую стойкость к органическим растворителям, оптически прозрачны. Полимерные материалы позволяют совместить оптические узлы с деталями их крепления. Их можно выполнить как одно целое, так как легкая формовость полимеров делает возможным изготовление деталей сложной конфигурации, которую трудно получить на основе других материалов.

Возможны два варианта склеек пластин (с совпадающими и встречными направлениями векторов поляризации) и две схемы подключения сигналов управления к электродам биморфного элемента для достижения требуемого вида изгиба. Элементы 1 и 2 практически идентичны. Необходимый сдвиг относительно друг друга обеспечивается ступенчатой формой опоры 3. При плоской форме опоры 3 можно использовать биморфы разной длины, а согласование идентичности динамики их поведения обеспечить электрически – подбором коэффициента усиления сигналов управления элементами.

При сборке дефлектора в зависимости от его назначения (следающая или интерферометрическая задача) также возможны два варианта схемы подачи сигналов управления к элементам и схем расположения самих элементов, приводящих к согласован-

ному или противофазному изгибу пары, составляющей дефлектор. В первом случае он дает линейное перемещение объекта управления вдоль одной из координатных осей. Во втором – имеем дефлектор углового отклонения объекта управления – зеркала.

Цель оптимизации дефлектора заключается в увеличении чувствительности, крутизны преобразования и динамического диапазона характеристики управления. Иначе отношение перемещения свободного конца биморфа к сигналу управления должно быть максимальным при достаточных точности стабилизации объекта управления, быстродействии, механической прочности и надежности конструкции. Перемещение конца биморфа определено его деформацией, описываемой уравнением обратного пьезоэффекта: $S_1 = d_{31}E_y + S_{11}^E T_1$, где d_{31} – пьезомодуль, E_y – напряженность электрического поля, S_{11}^E – постоянная упругости (податливость), T_1 – упругое механическое напряжение. В общем случае ξ – перемещение свободного конца биморфа – является нелинейной (с наличием гистерезиса) функцией приложенного сигнала U_y управления $\xi = f(U_y)$.

Данный дефлектор позволяет получать угловые перемещения зеркала, определяемые удвоенным отношением ξ – смещения свободных концов биморфов к l_3 – межцентровому расстоянию точек крепления к ним зеркала

$$\alpha = 2\xi/l_3.$$

В случае крепления тяг к крайним граням зеркала это расстояние определяется геометрическими размерами зеркала. Нами использовались зеркала (5×5 и 8×5 мм) на подложке с алюминиевым отражающим слоем. Предполагая, что перемещение свободного конца биморфа линейно зависит от величины поданного на них сигнала управления U_y , в качестве которого служит сигнал ошибки положения изображения лазерного пучка, формируемого следающей системой [1], получим

$$\xi \sim K_{\pi} d_{31} l^2 U_y / 4a^2.$$

Здесь K_{π} – коэффициент пропорциональности, зависящий от типа материала, размеров, добротности и ряда других параметров биморфных элементов; d_{31} – поперечный пьезомодуль, l и a – длина и толщина биморфных элементов. В общем случае $l_1 \neq l_2$, $U_{1y} = U_{2y}$, но ξ_1 и ξ_2 могут быть тождественны $\xi_1 \equiv \xi_2$. Хотя для дефлектора углового отклонения выполнение этого условия не является строго обязательным. Добротность Q определяется по времени затухания τ_e собственных колебаний дефлектора ($\omega_0 = 2\pi f_0$) в e раз

$$Q = \omega_0 \tau_e / 2.$$

Результирующее угловое перемещение зеркала данным дефлектором по каждому из координатных направлений составляет

$$\alpha \sim 2K_{\Pi} d_{31} l^2 U_y / a^2 l_3.$$

Рациональный выбор схемы передачи усилия и мер исключения влияния случайных механических воздействий на элемент управления – зеркало – является важным фактором обеспечения необходимой точности управления дефлектором. Для улучшения его характеристик можно применять различные решения. Например, при использовании элементов треугольной формы вместо прямоугольной угловые перемещения зеркала возрастают в полтора раза ($\alpha_{\Delta} = 1,5\alpha_{\Pi}$) при одновременном расширении рабочего участка амплитудно-частотной характеристики. Для элементов треугольной формы участок частотной характеристики, свободный от механического резонанса, расширяется для слабонагруженного в два раза и в π раз – для сильно нагруженного дефлектора, когда масса нагрузки – зеркала – соизмерима с массой биморфного элемента.

Практическая конструкция дефлектора на основе ЦТС-19 обеспечивала угловые перемещения зеркала в диапазоне $\pm 1,5^\circ$, в то время как турбулентное размытие и дрожание изображения на реальных трассах, например в астрономических телескопах составляет величину на три порядка меньшую. Таким образом, применение дефлектора с высокой чувствительностью к угловым отклонениям для компенсации случайных смещений изображения позволило почти на два порядка снизить требуемую для управления амплитуду сигнала рассогласования положения изображения пучка, который служит сигналом управления при адаптации.

Динамические свойства дефлектора исследованы путем оценки прямых показателей качества переходного процесса. Переходный процесс установки дефлектора является несимметричным колебательным и состоит из суммы высокочастотной колебательной и апериодической медленно меняющейся составляющих. Это обусловлено наличием вещественных и комплексно-сопряженных корней решения полинома общего описания дефлектора как звена системы автоматического управления. Практически дефлектор представляет собой распределенную с несколькими степенями свободы колебательную систему с передаточной функцией, отражаемой отношением нормированных степенных полиномов:

$$\Phi = \frac{\xi(p)}{U_y(p)} = K \frac{B_m(p)}{A_n(p)} = K \frac{b_m p^m + \dots + b_1 p + 1}{a_n p^n + \dots + a_1 p + 1},$$

где K – статический коэффициент передачи дефлектора; $n > m$ и $n \geq 2$.

В случае управления медленно меняющимся сигналом передаточная функция дефлектора имеет вид колебательного звена второго порядка

$$\Phi(p) = K / (\tau_0^2 p^2 + 2D\tau_0 p + 1),$$

где τ_0 – постоянная времени, $D = \omega/2Q$ – декремент затухания, $\omega = 2\pi f$ – круговая частота, Q – добротность дефлектора. Учет распределенного характера управляемого следящей системой дефлектора позволяет использовать специальные методы повышения устойчивости и снижения динамической погрешности в контуре управления.

В управляемой системе на дефлектор подается сигнал $U[\Delta Z(t)]$, пропорциональный рассогласованию $\Delta Z(t) = Z_i(t) - Z_0(t)$ – разности координат текущего $Z_i(t)$ и опорного $Z_0(t)$ положений изображения пучка. Установка зеркала – элемента управления – в текущее положение $Z(t)$, например, по оси X плоскости $Z(x, y)$ будет происходить в первом приближении по следующей зависимости:

$$x_i(t) = x_0(t) + \Delta x_i(t) \exp(-Dt) \cos(\omega t + \varphi),$$

где ω и φ – круговая частота и фаза управляющего сигнала $U[\Delta x(t)]$.

Среднее значение координаты положения изображения, управляемого дефлектором, найдется интегрированием в интервале периода колебаний биморфа ($0: \tau_\delta$) с последующим нормированием

$$\overline{x(t)} = \int_0^{\tau_\delta} x(t) p(t) dt / \int_0^{\tau_\delta} p(t) dt.$$

Здесь $p(t)$ – симметричная весовая функция, удовлетворяющая условию $\int_0^{\tau_\delta} p(t) dt = \tau_\delta$. Период колебаний установки элемента управления в новое положение жестко связан с резонансными свойствами дефлектора как колебательного звена. Ошибку установки элемента управления в заданное положение $[x_i(t) - x_0(t)]$ найдем из вышеприведенных выражений (для $p_0 = 1$). Представив весовую функцию $p(t)$ в виде ряда Фурье $p(t) = 1 + \sum_{k=1} p_k \cos k\omega t$ (p_k – коэффициенты ряда Фурье), получим

$$\begin{aligned} \overline{x(t)} - x_0(t) &= \\ &= \frac{\Delta x(t)}{\tau_\delta} \sum_{k=0}^{\infty} p_k \left[\int_0^{\tau_\delta} \exp(-Dt) \cos(\omega t + \varphi) \cos k\omega t dt \right]. \end{aligned}$$

Если ограничить точность вычисления погрешности установки элемента управления членами порядка малости D^2 , то после интегрирования и некоторых упрощений ошибка примет вид

$$\overline{x(t)} - x_0(t) = \frac{\Delta x(t)D}{\omega} \sin \varphi \left(\sum_{k=2}^{\infty} \frac{p_k}{k^2 - 1} - 1 \right).$$

Условию минимизации ошибки управления $[(\overline{x(t)} - x_0(t)) \rightarrow 0]$ удовлетворяет $p_2 = 3$, при котором весовая функция принимает вид $P(t) = 1 + 3\cos 2\omega t$. Отсюда среднее значение координаты положения элемента управления на такте τ интервала управления ($\tau_\delta = n\tau$) дефлектором составит

$$\begin{aligned} \bar{x}_0 &= \frac{1}{\tau_\delta} \int_0^{\tau_\delta} x_0(t)(1 + 3\cos 2\omega t)dt = \\ &= x_0 \left(1 + \frac{3}{2\omega\tau} \sin \omega\tau \right). \end{aligned}$$

Для тактовых частот управления дефлектором, близких к резонансным ($\omega\tau \sim 0,5$), и $\sin \omega\tau \sim \omega T$, и $x_{0\epsilon} = 2,5x_0$. Отсюда можно сделать вывод, что на тактовой частоте управления дефлектором, близкой к резонансной, амплитуда перемещения зеркала в два с половиной раза превышает требуемую. Этот вывод подтверждается поведением амплитудно-частотной характеристики. Другими словами, на тактовой частоте обработки дефлектором сигнала ошибки положения изображения ввиду увеличенной чувствительности примерно в 2,5 раза требуются меньшие сигнал управления и коэффициент усиления цепи обратной связи, что повышает быстродействие, точность управления и стабилизации изображения, а также устойчивость системы в целом.

Динамическую точность стабилизации изображения дефлектором можно повысить, используя вторую производную сигнала ошибки системы слежения, являющегося сигналом управления дефлектором. Формировать сигнал, пропорциональный второй производной сигнала ошибки, необходимо при совпадении знаков ускорения и скорости ошибки стабилизации изображения, когда объект управления – зеркало – разгоняется. В противном случае использование второй производной сигнала управления по ошибке ухудшает процесс стабилизации изображения. Благодаря тому, что спад дополнительного сигнала после снижения до заданного ускорения перемещения зеркала идет по монотонной экспоненциальной или линейной зависимости, а не скачкообразно, дефлектор плавно выходит на режим стабилизации и переходный процесс установления зеркала в заданное положение становится монотонным. Применение второй производной сигнала ошибки на этапе разгона при перемещении зеркала в новое положение позволит повысить еще и быстродействие системы. Так, при подаче на дефлектор

ступеньки сигнала ошибки положения объекта зеркала устанавливается в требуемое положение примерно за время, равное $3\tau_\delta$ (τ_δ – постоянная времени дефлектора). При использовании второй производной сигнала управления на этапе разгона установка зеркала в требуемое положение произойдет уже на первом такте переходного процесса, обеспечивая в идеальном случае трехкратный выигрыш в быстродействии одновременно с повышением в точности стабилизации изображения.

Настоящий дефлектор как элемент системы стабилизации изображения эффективно подавляет низкочастотную и высокочастотную части спектра угловых флуктуаций и случайных смещений центра тяжести изображения лазерного пучка, испытывающего искажающее влияние стохастического воздействия неоднородной турбулентной среды (рис. 2). При стабилизации изображения важно не только сохранение направления визирования объекта – среднего значения угловой координаты, но и ограничение амплитуды остаточных высокочастотных, не скомпенсированных дефлектором, угловых флуктуаций излучения и координат изображения долей ухудшения предела углового разрешения оптики системы.

Очевидным недостатком дефлектора как обособленного прецизионного устройства является подверженность влиянию шумовых вибраций, особенно той части, вектор которых действует в направлении наименьшей жесткости пластин биморфа.

Часто вибрации имеют неравномерное спектральное распределение с амплитудными выбросами на частотах вращения электромеханических устройств, сервоприводов управления и резонансных частот отдельных узлов системы. Верхняя граница низкочастотного спектра вибраций обычно лежит в пределах 60 Гц и реже простирается до 300–400 Гц. Ускорение зеркала a_v пропорционально квадрату частоты вибраций, на которые накладываются выбросы на частотах резонансов элементов дефлектора. Линейные вибрации преобразуются в угловые колебания зеркала той же частоты за счет неизбежных погрешностей совмещения центра зеркала с центром масс и ограниченной жесткости конструкции. При адаптации вибрационная часть спектра воздействия компенсируется в замкнутом контуре, но влияние инерции нагрузки, зеркала, сохраняется.

Управление дефлектором в системе осуществляется векторным сигналом рассогласования $\Delta Z(t, \tau)$ в плоскости $Z(x, y)$, определяемым соотношением

$$\Delta Z(t_\tau) = \hat{Z}(t_j) - Z(t_i),$$

где $\hat{Z}(t_j)$ и $Z(t_i)$ – измеренные значения координат положения изображения в моменты времени t_i и

$t_j = t_i + \tau$, разделенные интервалом запаздывания, в течение которого формируется оценка и проводится коррекция текущих координат изображения. Текущие координаты изображения в плоскости измерения – это случайный процесс, порожденный искажениями волнового фронта, принимаемого системой излучения. Время запаздывания при оценке изменения координат порождает динамическую погрешность измерения координат изображения относительно $Z_0(t_j)$ – координат истинного положения изображения в плоскости наблюдения

$$\Delta Z_g(t, \tau) = \hat{Z}(t_j) - Z_0(t_j).$$

Оценка динамической составляющей погрешности измерения координат в сигнале управления дефлектором может быть представлена в виде [1]

$$\Delta Z_g(t, \tau) = K_Z \sigma_Z [1 - \rho_Z^2(\tau)]^{1/2},$$

где K_Z – коэффициент, зависящий от распределения флуктуаций координат изображения в плоскости измерения; σ_Z – среднее квадратичное отклонение случайного процесса смещения центра тяжести изображения, $\rho_Z(\tau)$ – нормированная автокорреляционная функция процесса случайных смещений центра тяжести изображения, вид которой определяется статистикой среды распространения излучения. Для некоррелированных значений выборок $Z(t_{i,j})$: $K_Z = 0,5$ и дисперсия сигнала управления найдется из выражения

$$\sigma[Z(t)] = 0,5 \sigma_Z [\Delta Z(t, \tau)].$$

Эта оценка дисперсии сигнала управления является несмещенной, если выборки координат положения изображения $Z(t_j)$ и $Z(t_i)$ статистически независимы. Корреляция между выборками координат $Z(t_j)$ и $Z(t_i)$ приводит к смещению оценки среднего квадратичного отклонения. Обычно интервал τ между соседними выборками координат изображения в режиме слежения и адаптации меньше интервала корреляции процесса флуктуаций наклона волнового фронта для устойчивого управления компенсацией этих вариаций. Часто сигнал управления дефлектором является смесью регулярного или медленно меняющегося сигнала и случайных составляющих. Корреляционная функция такой смеси из-за влияния регулярной составляющей с ростом интервала между выборками не стремится асимптотически к нулю. Из-за этого появляется погрешность оценки среднего квадратичного отклонения составляющих сигнала управления кратных частоте выборки координат.

Для оценки влияния нестационарной составляющей процесса флуктуаций интервал выборки значений координат должен значительно превышать интервал корреляции выборок $Z(t_j)$ и $Z(t_i)$. Поэтому

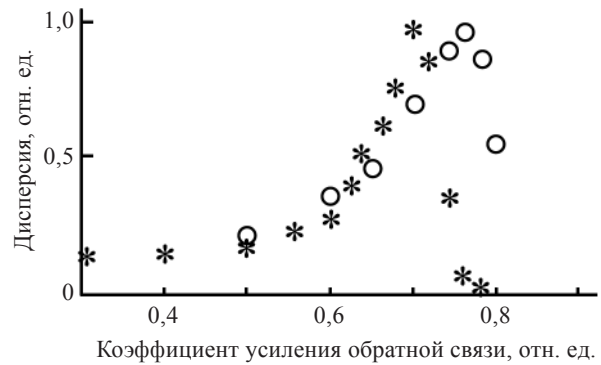


Рис. 2. Эффективность компенсации случайных смещений изображения в адаптивно-оптической системе с двухкоординатным дефлектором для коллимированного лазерного пучка, отраженного (○ – строго назад и * – под углом $0,6^\circ$) от плоского зеркала в условиях модельной турбулентной среды в зависимости от коэффициента усиления цепи обратной связи.

зависимость, представленная на рис. 2 и иллюстрирующая эффективность использования описываемого дефлектора в системе коррекции случайного наклона фронта лазерного пучка в турбулентной среде, строго говоря, справедлива для условий однородной турбулентности. Если учесть, что нестационарность флуктуаций наклона фронта – процесс достаточно медленный (спектр лежит в области частот от 0 до $0,01$ Гц), то можно ожидать, что он не окажет особого влияния на точность оценки эффективности работы настоящего дефлектора.

Мощность флуктуаций смещения изображения, обусловленных некомпенсированным случайным наклоном фронта, составляет

$$P_\Delta = \frac{1}{T} \int_0^T \Delta Z^2(t, \tau) dt.$$

Представляя процесс флуктуаций координат изображения в виде ряда Фурье и ограничивая разложение ряда первой составляющей $\sin \omega t$, в первом приближении получим оценку мощности остаточных флуктуаций смещения изображения – сигнала управления дефлектором в следующем виде:

$$P_\Delta = P_0 (1 - \cos \omega_{cp} \tau),$$

где P_0 – средняя мощность и ω_{cp} – средняя частота спектра случайных смещений изображения, обусловленных остаточными искажениями волнового фронта атмосферной средой. Учитывая, что практически частота выборки координат изображения намного (в m раз) выше средней частоты случайных смещений ($\omega_{cp} \tau \ll 1$), то средняя мощность ос-

таточных флуктуаций сигнала управления как процесса нескомпенсированных смещений изображения определится просто

$$P_{\Delta} = P_0 \left(1 - [1 - \omega_{\text{ср}}^2 \tau^2]^{1/2} \right) \sim 10^{-m} P_0.$$

В заключение можно сказать, что, хотя описываемый дефлектор создавался для адаптивной системы коррекции наклона волнового фронта, он может быть использован при контроле динамических характеристик и управлении параметрами систем, в том числе тепловизионной [9], так как обладает высокими временным (примерно долей миллисекунд) и пространственными линейным (примерно долей микрометров) и угловым ($\sim 10^{-6}$ рад) разрешениями в широком диапазоне.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слободян С.М. Телевизионная диагностика лазерных пучков. Барнаул: Азбука, 2006. 224 с.
2. Пустынский И.Н., Слободян С.М. Диссекторные следящие системы. М.: Радио и связь, 1984. 136 с.
3. Слободян С.М., Цупин А.А. Лазерные навигационные системы наведения автономных транспортных средств // Зарубежная радиоэлектроника. 1988. № 6. С. 13–20.
4. Ребрин Ю.К. Управление оптическим лучом в пространстве. М.: Советское радио, 1977. 336 с.
5. Джагунов Р.Г., Ерофеев А.А. Пьезокерамические элементы в приборостроении и автоматике. Л.: Машиностроение, 1986. 256 с.
6. Слободян М.С., Слободян С.М. Консольный пьезопровод // Датчики и системы. 2003. № 3. С. 47–48.
7. Слободян С.М., Яковлев А.Р. А. с. 1485188 СССР, МКИ G02B 26/10. Устройство углового отклонения // Изобретения. 1989. № 21.
8. Громов Ю.Н., Данилов А.А., Евтеев А.П., Рожанец А.В., Савельев В.Г., Цупин А.А. Оптическая система проводки судов // А. с. 1420816 СССР, МКИ В63В 49/00. Бюлл. изобрет. 1987. № 33.
9. Тевяшов В.И., Шушарин С.Н. Оптические дефлекторы для современных тепловизионных приборов // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 12–16.